Capsules INRSciences

Centre - Eau Terre Environnement
INRS
Université d'avant-garde

Capsule no. 10, février 2011

L'arbre : un registre naturel de la pollution atmosphérique[a]

Annick Doucet[b c]

La pollution atmosphérique

La pollution de l'air, bien que parfois de source naturelle (éruptions volcaniques, feux de forêts, etc.), est majoritairement produite par les activités humaines. Au Canada, les principales sources anthropiques de pollution atmosphérique sont le transport routier, les industries de transformation, les centrales énergétiques utilisant des combustibles fossiles, les installations industrielles et la combustion résidentielle. Ces sources de pollution génèrent surtout du dioxyde de carbone (CO_2), des oxydes de soufre (SO_x), des oxydes d'azote (NO_x), de l'ozone (O_3), des métaux et des particules en suspension. La pollution atmosphérique près des centres urbains est diffuse, c'est-à-dire qu'elle provient de multiples sources et combine plusieurs polluants. De plus, bien que ces polluants soient plus concentrés à proximité des lieux où ils sont émis, ils sont aussi transportés sur de grandes distances par les vents dominants et ne connaissent pas de frontières. En ce sens, l'air que nous respirons au Canada n'est pas uniquement contaminé par des polluants d'origine canadienne, mais aussi par ceux de divers pays parmi lesquels les États-Unis sont une source significative. La pollution atmosphérique n'est pas à prendre à la légère puisqu'elle a le potentiel d'augmenter le nombre de maladies cardio-vasculaires, de générer des maladies respiratoires, et parfois même des cancers. Par le biais de panaches de contamination, du smog et des pluies acides, la pollution atmosphérique peut avoir un impact non seulement sur la santé humaine, mais aussi sur la biosphère. Par exemple, le feuillage des végétaux peut être endommagé et leur croissance ralentie ou même complètement interrompue.

Le contrôle des émissions polluantes est réalisé par l'entremise de réglementations et de politiques sur la qualité de l'air. Or les mesures des émissions ne sont faites que depuis une trentaine d'années, et ce, majoritairement dans les centres urbains. De plus, les mesures sont souvent effectuées par les industries elles-mêmes. Pour pallier le manque de données historiques, il est possible d'utiliser des registres indirects pour étudier l'évolution à long terme de la pollution atmosphérique. Par exemple, les carottes de glace, la stratigraphie des sédiments de lacs, les lichens et les mousses peuvent révéler l'évolution de la pollution atmosphérique. Ces archives naturelles présentent cependant certaines lacunes, soit une faible résolution temporelle ou une distribution spatiale restreinte. Les carottes de glace offrent pour leur part une bonne précision temporelle, mais leur présence se limite généralement aux régions polaires et aux glaciers continentaux. Ainis. il est peut être moins pertinent d'utiliser ces archives pour documenter l'historique des polluants atmosphériques pour le Québec, particulièrement pour les régions urbaines et leurs alentours.

---

[a] Cette capsule est disponible en ligne à l'adresse suivante : www.ete.inrs.ca/ete/publications#Capsules INRSciences

[b] Étudiante au doctorat sous la supervision de la professeure associée Martine M. Savard et sous la cosupervision du professeur associé Christian Bégin, tous deux chercheurs scientifiques à la Commission géologique du Canada

[c] INRS – Centre Eau Terre Environnement, 490 de la Couronne, Québec (QC) G1K 9A9, annick.doucet@ete.inrs.ca

Les arbres en tant que stations de mesure de la pollution

Depuis quelques années, les scientifiques ont découvert que les arbres ont le potentiel d'archiver les conditions environnementales ambiantes dans les variations de la largeur et de la composition géochimique de leurs cernes de croissance. On nomme dendrogéochimie l'étude de la composition géochimique des arbres.

Les arbres croissent à l'interface entre l'atmosphère et le sol et puisent leurs ressources de ces deux milieux. Ainsi, lors de la photosynthèse, les arbres absorbent le CO_2 de l'air ambiant, et par le fait même les polluants atmosphériques aussi présents (figure 1). Les racines des arbres absorbent l'eau et les éléments qu'elle contient, ceux naturellement présents dans le sol, mais aussi ceux provenant des dépositions atmosphériques. Les polluants déposés s'infiltrent dans le sol grâce aux précipitations. Une partie des polluants accumulés dans le sol devient biodisponible et est absorbée par les racines. Les éléments absorbés par les arbres (via les racines, les feuilles et l'écorce) sont ensuite fixés dans les cernes de croissance où ils se traduisent par des variations des rapports isotopiques ou de la concentration en métaux. Un rapport isotopique est une mesure de la différence de quantité entre deux isotopes d'un même élément (les isotopes diffèrent dans leur poids atomique et leur nombre de neutrons). Le fractionnement isotopique, c'est-à-dire la répartition des isotopes d'un élément, est enregistré dans les cernes de croissance par les processus physiologiques des arbres en réponse aux conditions environnementales ambiantes (paramètres climatiques et pollution atmosphérique).

Sous nos latitudes, c'est l'interruption hivernale de la croissance des arbres qui permet d'utiliser les cernes comme registre annuel des conditions environnementales. Au printemps, lorsque les conditions climatiques redeviennent favorables,

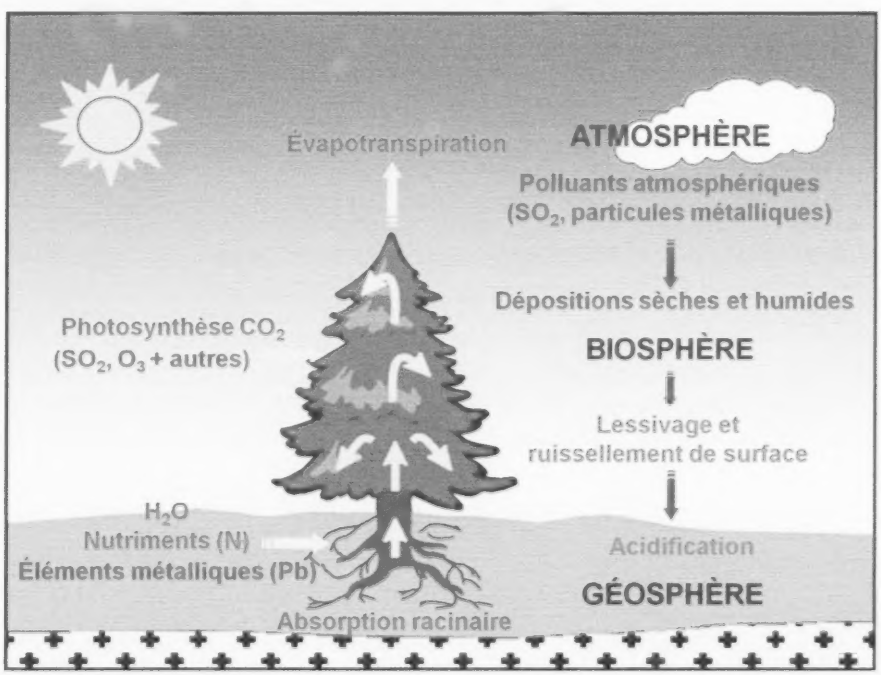

Figure 1 : Principales voies d'assimilation par les arbres des polluants atmosphériques contenus dans l'air, l'eau et le sol (modifiée de Savard *et al.*, 2005).

les arbres reprennent leur croissance. Au printemps et durant l'été, les cellules bien alimentées en sève sont grandes avec des parois minces, ce qui produit la partie pâle du cerne (bois initial; figure 2). Puis, à mesure que les températures de l'air se refroidissent, les cellules deviennent graduellement plus petites, leurs parois s'épaississent et elles sont moins nombreuses puisque la sève circule en plus faible quantité dans l'arbre, ce qui forme la partie plus foncée du cerne (bois final; figure 2). Ce changement de coloration permet de différencier la croissance d'une année à l'autre et de dater chacun des cernes de l'arbre.

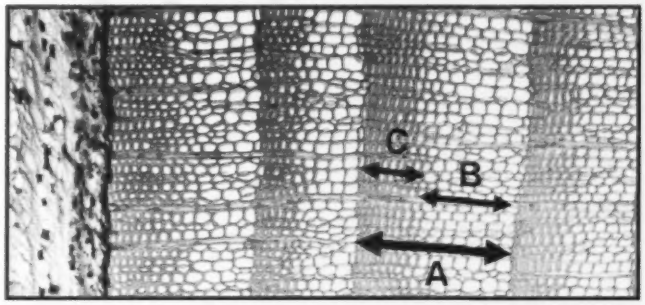

Figure 2 : Série de quatre cernes de croissance annuelle d'un arbre se terminant par l'écorce. A) Cerne complet. B) Bois initial formé au printemps et en été. C) Bois final formé à l'arrivée des conditions automnales.

La dendrochronologie, c'est-à-dire l'interdatation des cernes de plusieurs arbres vivants, morts ou fossilisés, permet la reconstitution du patron de croissance à long terme des arbres sur plusieurs centaines, voire milliers d'années (figure 3). Cette étape de datation est cruciale pour pouvoir ensuite utiliser les cernes de croissance des arbres pour reconstituer la pollution atmosphérique à une résolution annuelle.

Les séquences de rapports isotopiques ou de concentrations en métaux enregistrées annuellement dans les cernes de croissance permettent de reconstituer dans le temps certaines perturbations environnementales de sources naturelles et anthropiques, comme l'évolution de la pollution, tout en comblant les lacunes citées précédemment pour les autres types d'archives naturelles : 1) les cernes de croissance des arbres permettent une analyse de la pollution atmosphérique à une résolution annuelle, 2) les arbres ont une distribution géographique très étendue, ils sont présents dans la plupart des milieux, 3) les arbres vivent longtemps, donc en utilisant plusieurs arbres couvrant différentes périodes temporelles, il est possible d'allonger la brève période couverte par les mesures directes de pollution à plusieurs dizaines, voire centaines d'années. Chaque arbre peut ainsi être perçu comme une station de mesure de la pollution atmosphérique!

Comment extraire les données sur la pollution contenues dans les arbres?

L'extraction des informations contenues dans la composition géochimique des cernes de croissance nécessite plusieurs étapes avant de pouvoir utiliser ces données pour reconstituer l'historique de la pollution atmosphérique d'un site. Tout d'abord, des carottes de bois sont prélevées à l'aide d'une sonde de Pressler de 5 ou 12 mm de diamètre sur un nombre représentatif d'arbres

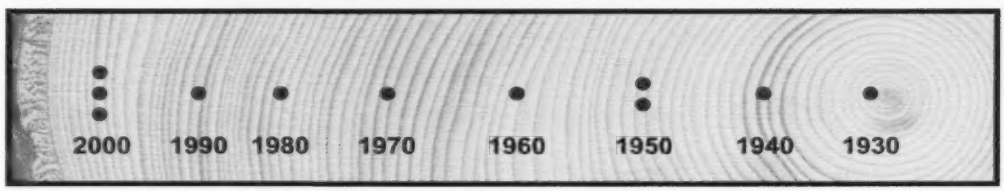

Figure 3 : Exemple de datation des cernes de croissance d'un arbre.

(figure 4). On mesure ensuite la croissance radiale des échantillons et on procède à l'interdatation grâce à la dendrochronologie. L'étude des séries de largeurs de cernes permet de vérifier qu'aucune perturbation extérieure, par exemple une épidémie d'insectes, n'a affecté les arbres étudiés. De ces arbres, on sélectionne un certain nombre de vieux spécimens (trois au minimum) ne présentant aucun signe de difficulté de croissance.

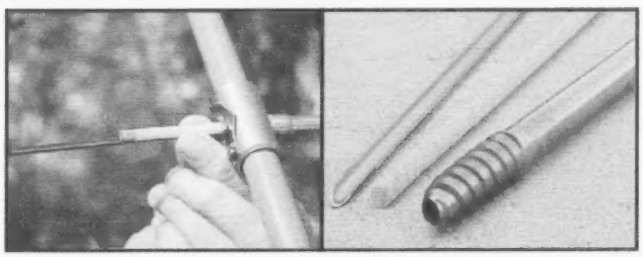

Figure 4 : Sonde de Pressler de 5 mm et carotte de bois échantillonnée.

Les cernes annuels de ces échantillons sont d'abord découpés à l'aide d'une lame de rasoir (figure 5). Ensuite, les échantillons de bois sont pesés puis traités en laboratoire en fonction du type d'analyse prévue. Si on veut analyser les rapports isotopiques du carbone ($\delta^{13}C$), de l'oxygène ($\delta^{18}O$), les échantillons sont broyés mécaniquement, puis traités pour en extraire la cellulose, et enfin analysés par spectrométrie de masse à rapport isotopique. Si ce sont les rapports isotopiques du plomb ou les concentrations en métaux que l'on cherche à analyser, les échantillons sont découpés en petits morceaux, soumis à une digestion totale afin de rendre disponibles les métaux qu'ils contiennent, puis sont analysés à l'aide de la spectrométrie de masse couplée à un plasma. Finalement, on effectue le traitement statistique des mesures obtenues pour générer des séries temporelles de rapports isotopiques ou de concentrations en métaux.

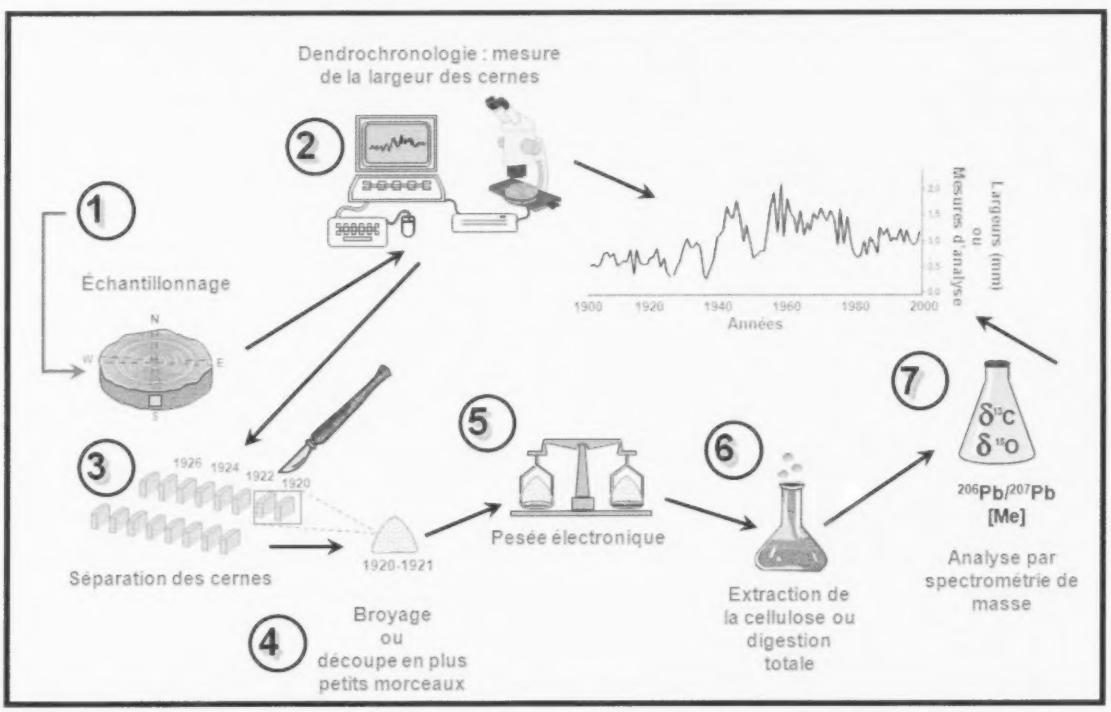

Figure 5 : Étapes requises pour extraire les données de pollution contenues dans les cernes de croissance des arbres (modifiée de Savard *et al.*, 2005)

Étude dendrogéochimique dans la région de la Capitale-Nationale

Un bon exemple de l'utilité de la dendrogéochimie dans le domaine de la pollution atmosphérique est une étude réalisée sur des épinettes rouges de la réserve écologique de Tantaré, située à proximité de la ville de Québec. Cette étude a permis de reconstituer l'historique de la pollution atmosphérique diffuse dans la région de la Capitale-Nationale. La réserve écologique de Tantaré représente l'un des rares lieux en périphérie de la ville de Québec (~40 km au nord-ouest) qui, en plus d'être protégé depuis plus de 30 ans et de n'avoir subi aucun impact anthropique majeur depuis environ 350 ans, permet l'étude d'arbres vivants de plus de 200 ans.

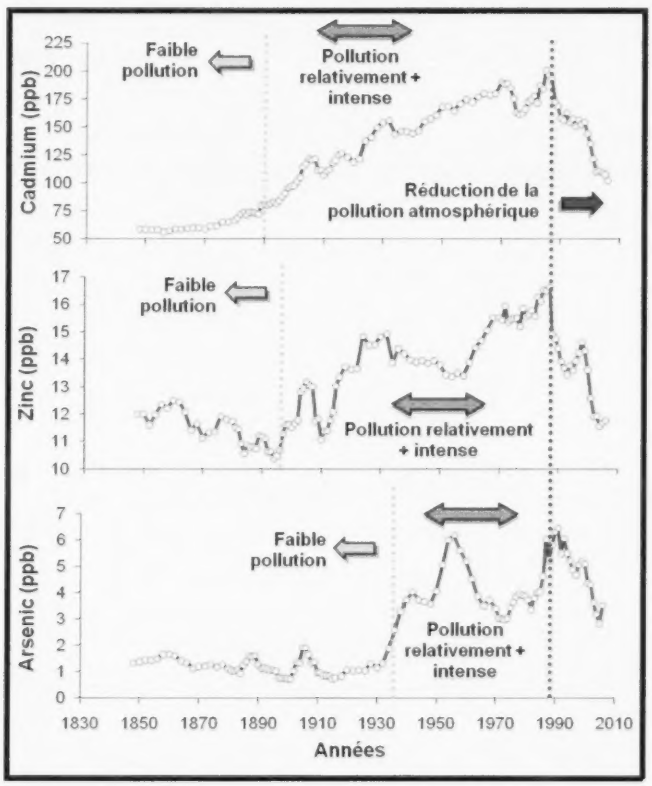

Figure 6 : Séries des concentrations de cadmium, de zinc et d'arsenic (en partie par milliards, ppb) provenant d'épinettes rouges de la réserve écologique de Tantaré dans la région de Québec.

Voici un bref aperçu d'une partie des résultats de cette étude. Tout d'abord, les séries de concentrations de cadmium, de zinc et d'arsenic des épinettes rouges ont révélé que les émissions de ces métaux étaient faibles de 1840 jusqu'au début du 20e siècle, celles-ci ont ensuite graduellement augmenté jusqu'à la fin des années 1980, et enfin, elles ont fortement diminué à partir de 1990 (figure 6). Le fait que ces trois séries dendrogéochimiques (cadmium, zinc et arsenic) indiquent toutes une évolution similaire, malgré des sources d'émission différentes pour chacun de ces métaux, peut être principalement associé aux diverses périodes économiques qu'a subi la province de Québec ainsi qu'à l'utilisation de combustibles fossiles, surtout le charbon qui émet une quantité importante d'oxydes de soufre (SO_x) et de métaux. Ainsi, l'augmentation de la concentration du cadmium et du zinc au début des années 1900 est liée à l'expansion économique de la ville de Québec. Durant cette période, plusieurs industries se sont établies autour de la ville, comme des usines de pétrochimie et de production de métaux non ferreux, et les voies maritimes et ferroviaires ont été développées. Les augmentations subséquentes des métaux étudiés sont principalement associées aux périodes de prospérité économique qui ont suivi les deux guerres mondiales et à l'établissement de plusieurs industries polluantes, comme des usines de production de munitions à Québec et dans ses environs, la cimenterie St-Laurent, l'incinérateur de Québec, etc. Les deux pics d'augmentation visibles dans la série de concentrations d'arsenic sont synchrones avec la forte utilisation de pesticides contenant de l'arsenic dans les années 1930 et du bois traité à l'arsenic dans les années 1980. Finalement, l'importante diminution des concentrations de cadmium, de zinc et d'arsenic à partir de la fin des années 1980 est le résultat de l'application de lois environnementales plus sévères concernant les émissions de SO_x, autant au Canada qu'aux États-Unis.

À son tour, la série des valeurs $\delta^{13}C$ des épinettes rouges montre une augmentation des valeurs à partir de 1944 (figure 7). Pour vérifier si cette augmentation a été causée par le climat, les valeurs $\delta^{13}C$ des arbres ont été modélisées à partir des données climatiques (températures maximales et précipitations annuelles) de la période 1880-1909. Cette période représente l'intervalle le plus ancien couvert par les données climatiques disponibles et potentiellement la période la moins polluée des années étudiées. La concordance des valeurs $\delta^{13}C$ modélisées à partir du climat avec celles mesurées entre 1880 et 1943 montre que l'assimilation du carbone par les arbres durant cette période est principalement contrôlée par le climat. Alors qu'entre 1944 et 2007, l'écart entre les valeurs $\delta^{13}C$ mesurées et prédites par le modèle indique qu'un facteur autre que le climat a influencé les valeurs $\delta^{13}C$ des épinettes rouges (figure 7). Lorsqu'on additionne les valeurs $\delta^{13}C$ obtenues d'un modèle incluant la série de données disponibles la plus complète sur la pollution atmosphérique (la consommation de combustible fossile entre 1958 et 2000) aux valeurs $\delta^{13}C$ du modèle climatique, la concordance des valeurs mesurées et modélisées devient relativement bonne, ce qui confirme la forte influence de la pollution atmosphérique sur l'assimilation du carbone dans les arbres pour cette période (figure 7). En 2007, l'écart encore important entre les valeurs $\delta^{13}C$ mesurées et celles modélisées à partir du climat indique que plusieurs polluants, tels que les NO_x et les particules en suspension, sont toujours présents en quantité importante dans l'air de la Capitale-Nationale.

La région périurbaine de Québec est donc soumise à une pollution atmosphérique provenant de plusieurs sources, une pollution qui augmente au début du 20e siècle et atteint un maximum dans les années 1980. Bien qu'une importante portion de cette pollution ait diminué depuis 1990, la pollution atmosphérique diffuse demeure toutefois assez élevée pour être bien visible dans la géochimie des arbres.

La combinaison de ces résultats avec d'autres indicateurs examinés dans cette étude confirme que les arbres sont sensibles à la pollution atmosphérique diffuse et qu'ils permettent de reconstituer l'évolution de la qualité de l'air à travers les siècles, et ce, pour un vaste territoire.

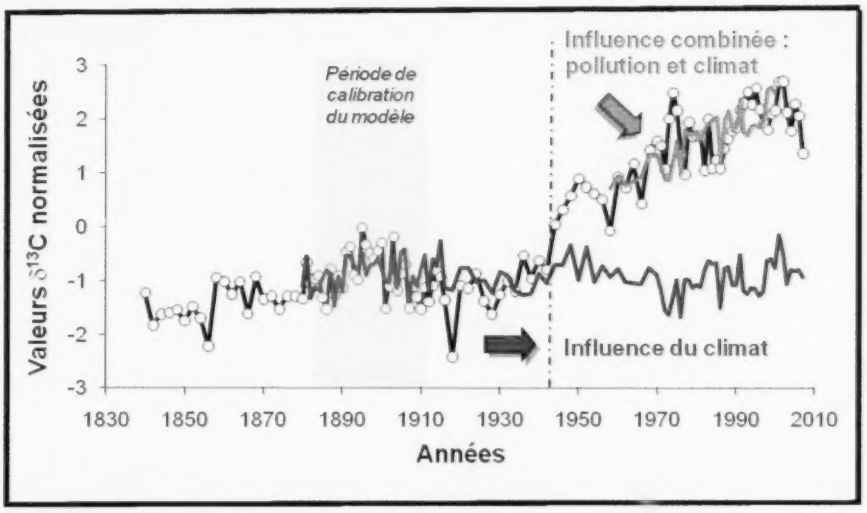

Figure 7 : Comparaison entre la série des valeurs $\delta^{13}C$ d'épinettes rouges de la réserve écologique de Tantaré (ligne noire) avec les valeurs $\delta^{13}C$ modélisées à partir du climat (ligne bleue) et celles provenant de l'addition des modèles climatique et de la pollution atmosphérique (ligne rouge).

Pour en savoir plus...

Pollution atmosphérique

Site du gouvernement fédéral sur la pollution au Canada. Le site décrit bien l'état de la pollution atmosphérique, les sources de pollution et les actions mises en œuvre pour la contrôler, etc.
www.ec.gc.ca/pollution/Default.asp?lang=Fr&n=1BB199B9-0

Site du gouvernement du Québec sur l'état de la pollution dans la province, l'inventaire des émissions atmosphériques, etc.
www.mddep.gouv.qc.ca/changements/plan_action/index.htm

Dendrochronologie

Pour tout savoir sur la dendrochronologie (en anglais) : http://web.utk.edu/~grissino/

Survol de la dendrochronologie (en français) : www.grdh-dendro.com/la-dendrochronologie/

Dendrogéochimie

Rinne, K.T., Loader, N.J., Switsur, V.R., Treydte, K.S. et Waterhouse, J.S., 2010. Investigating the influence of sulphur dioxide (SO_2) on the stable isotope ratios ($\delta^{13}C$ and $\delta^{18}O$) of tree rings. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(8) : 2327-2339.
doi: 10.1016/j.gca.2010.01.021

Saurer, M., Cherubini, P., Ammann, M., Cinti, B.D. et Siegwolf, R., 2004. First detection of nitrogen from NO_x in tree rings: a $^{15}N/^{14}N$ study near a motorway. *Atmospheric Environment*, 38(18) : 2779-2787.
doi: 10.1016/j.atmosenv.2004.02.037

Savard, M.M., 2010. Tree-ring stable isotopes and historical perspectives on pollution - An overview. *Environmental Pollution*, 158(6) : 2007-2013.
doi : 10.1016/j.envpol.2009.11.031

Savard, M.M., Bégin, C., Parent, M., Marion, J. et Smirnoff, A., 2006. Dendrogeochemical distinction between geogenic and anthropogenic emissions of metals and gases near a copper smelter. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 6(2-3) : 237-247.
doi: 10.1144/1467-7873/05-096

Savard, M.M., Bégin, C., Parent, M., Marion, J., Smirnoff, A., Hou, X., Tassé, N. and Sharp, Z., 2005. Distinction des accumulations de métaux provenant de sources géogènes et anthropiques aux environs de la fonderie Horne : la dendrogéochimie en tant qu'outil de surveillance environnementale. *Dans* Metals in the environment around smelters at Rouyn-Noranda, Quebec, and Belledune, New Brunswick: results and conclusions of the GSC MITE Point Sources Project; Commission géologique du Canada, Bulletin 584.
http://geopub.nrcan.gc.ca/moreinfo_f.php?id=221047